



PMI 3809 – Cinética de flotação

O processo de flotação pode ser segmentado em uma série de eventos consecutivos que permitem uma visão mais clara dos mecanismos e, conseqüentemente, seu melhor controle (Finch e Dobby, 1990):

- i. Após a polpa adentrar a célula de flotação, o sistema tem que criar condições para que partículas e bolhas possam se encontrar. Para isto, é necessário que colisões ocorram dentro da célula de flotação. Tratando-se de um evento, podemos interpretar a Eficiência de Colisão (E_C) como a probabilidade de colisão (P_C);
- ii. Após ocorrer uma colisão com sucesso, é necessário que ocorra adesão das partículas às bolhas. Assim sendo, podemos interpretar a Eficiência de adesão (E_A) como uma probabilidade de adesão (P_A);
- iii. Após a adesão, bolhas e partículas formam um agregado que deverá resistir à turbulência do meio para não ser destruído. A sobrevivência do agregado durante seu transporte até a camada de espuma pode ser interpretada como um evento e, deste modo, a Eficiência de Preservação (E_P) pode ser interpretada como a probabilidade de preservação do agregado (P_P).

Conhecidos os eventos e sua probabilidade de sucesso, podemos calcular a probabilidade total de flotação (P_F) em função das probabilidades individuais de colisão, adesão e sobrevivência do agregado, conforme apresentado na Expressão 1. Por analogia, a Eficiência de Coleta (E_K) poderia ser interpretada como a probabilidade total de flotação, isto é, $E_K = P_F$, conforme reza a Expressão 2.

$$P_F = P_C P_A P_P \quad (1)$$

$$E_K = E_C E_A E_P \quad (2)$$



É importante cogitar sobre como essa probabilidade de flotação (P_F) ou Eficiência de Coleta (E_K) poderia ser relacionada à recuperação metalúrgica (R) do processo. De fato, tal probabilidade vai determinar em larga extensão uma variável cinética importantíssima que é a constante cinética (k) de flotação, que está relacionada a E_K e S_b através da Expressão 3, que é válida para um modelo cinético de 1ª ordem.

$$k = \frac{1}{4} S_b E_K \quad (3)$$

Onde S_b = Fluxo superficial de bolhas [min^{-1}], representando a área superficial de bolhas que passam pela área transversal da célula de flotação por unidade de tempo (min).

Ordem da cinética de flotação

Seja o processo de flotação conforme ilustrado na Figura 1:

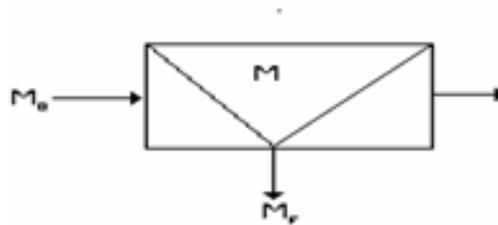


Figura 1. Representação de uma operação unitária de flotação.

Nesse processo, o mineral que se deseja flotar entra na célula com massa inicial M_0 , ou seja, no instante inicial ($t_0=0$) a massa de mineral útil na polpa é M_0 . Decorrido um tempo t , a massa de mineral útil que flotou durante o intervalo de tempo Δt (onde $\Delta t = t-t_0$) é representada pela letra M_f e a massa que permaneceu na polpa é representada pela letra M . Deste modo, são válidas as expressões:

$$M = M_0 - M_f \quad (4)$$

$$R = (M_f/M_0) = (M_0 - M) / M_0 \quad (5)$$



Onde:

M = Massa de mineral útil que está presente na polpa em um determinado instante t ;

M_0 = Massa de mineral útil que alimentou a flotação;

M_f = Massa de mineral útil que flotou no intervalo de tempo $\Delta t = t - t_0$.

Se a velocidade com que ocorrerá a remoção de mineral útil da célula (velocidade de flotação) for proporcional à quantidade de mineral útil presente na polpa, então é válida a Expressão 6:

$$(-dM/dt) = k M^n \quad (6)$$

Onde: k = Constante cinética e n = Ordem da “reação”.

Se a cinética de flotação for de primeira ordem ($n=1$), então a equação diferencial apresentada na Expressão 6 terá a solução exibida na expressão (7).

$$R = 1 - e^{-kt} \quad (7)$$

Para $n \neq 1$, com base na Expressão 5 e Expressão 6, é possível desenvolver uma equação geral (Expressão 8) que relaciona a recuperação com o tempo de flotação, velocidade de flotação (ou constante cinética) e ordem. O desenvolvimento é apresentado no Quadro 1.

$$[(1-n)^{-1} (1-R)^{1-n}] - (1-n)^{-1} = M_0^{n-1} kt \quad (n \neq 1) \quad (8)$$

Para $n=0$, teremos a Expressão 9.; enquanto que para $n=2$, teremos a Expressão 10:

$$R = M_0^{-1} k t \quad (9)$$

$$[R/(R-1)] = M_0 k t \quad (10)$$

Comparando as equações que relacionam R com t para várias ordens ou mecanismos, poderemos dizer que:



$$\frac{dM}{dt} = -M_0 \frac{dR}{dt} = -kM^n$$

$$M_0 \frac{dR}{dt} = k[M_0(1-R)]^n$$

$$M_0 \frac{dR}{dt} = kM_0^n(1-R)^n$$

$$\frac{dR}{(1-R)^n} = \frac{M_0^n}{M_0} k dt$$

$$(1-R)^{-n} dR = M_0^{n-1} k dt$$

$$\int_0^R (1-R)^{-n} dR = \int_0^t M_0^{n-1} k dt$$

$$\frac{(1-R)^{1-n}}{1-n} - \frac{1}{1-n} = -M_0^{n-1} kt$$

Quadro 1. Dedução da Expressão 8.

- i. Primeira ordem caracteriza uma cinética mais rápida, sendo que quanto maior for a quantidade de partículas hidrofóbicas na polpa, mais rápida será a flotação; isto é, os eventos colisão, adesão e preservação do agregado estão em sua máxima eficiência ou ocorrendo com máxima probabilidade;
- ii. Uma cinética de segunda ordem é mais lenta que a de primeira ordem, podendo significar que algum(ns) dos três eventos (colisão, adesão ou preservação do agregado) está(ão) ocorrendo com baixa eficiência ou probabilidade;
- iii. Cinética de ordem zero significa que a recuperação não depende dos mecanismos de colisão, adesão e preservação que caracterizam uma flotação verdadeira. Neste caso, a flotação ocorre por arraste hidrodinâmico, também chamado de *entrainment*.



Uma vez que as condições hidrodinâmicas presentes na célula de flotação influenciam os eventos de colisão, adesão e preservação do agregado, essas mesmas condições também influenciarão a constante cinética (k) e a ordem de reação (n), conforme ilustrado na Figura 2 e Tabela 1, de acordo com Rodrigues e Leal Filho (2000).

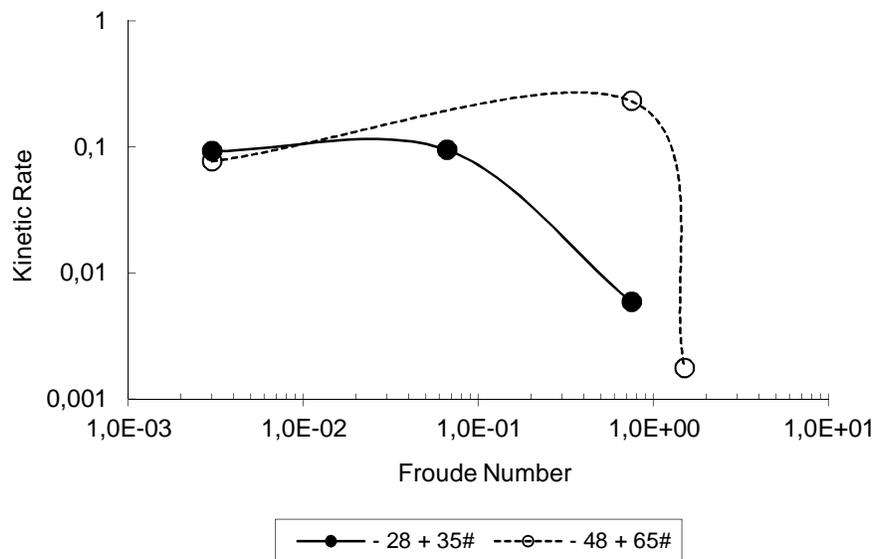


Figura 2 Influência do número de Froude na constante cinética de flotação de esferas de vidro (Leal Filho e Rodrigues, 2000).

Tabela 1 Influência de alguns números hidrodinâmicos adimensionais na constante cinética e ordem de flotação de esferas de vidro (-48#+65#) (Leal Filho e Rodrigues, 2000).

Número de Reynolds	Número de Froude	Constante Cinética	Ordem
467	0,003	$0,080 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$	2
7643	0,75	$0,230 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$	2
11046	1,5	$0,02 \text{ g s}^{-1}$	0



Para estudar a cinética de flotação de alguma espécie mineral em particular, há que se executar ensaios de flotação, recolhendo-se as massas flotadas em intervalos de tempo regulares, analisando teores e calculando a recuperação do(s) mineral(is) de interesse versus tempo. Após esta etapa experimental, passa-se à análise dos dados, que pode ser efetuada por dois métodos: o método integral e o método tempo fracionário. No método da análise integral, seleciona-se um modelo cinético (primeira ordem, segunda ordem, etc) e a correspondente equação que relaciona recuperação com constante cinética (k) e, após tratamentos matemáticos e integrações apropriadas, são relacionados num gráfico de coordenadas cartesianas os dados de R e t para se obter uma reta. Colocando os dados em um gráfico, a obtenção de uma função razoavelmente linear indica o acerto na escolha da ordem (Connors, 1990). O método do tempo fracionário, parte da Expressão 8, na qual o termo $(1-R)^{1-n}$ é expandido numa série binomial que, por sua vez, é truncada após o termo quadrático. Este ajuste conduz à Equação 11.

$$R = k M_0^{n-1} t - (n/2) R^2$$

(11)

Em baixa recuperação, $R = k M_0^{n-1} t$. Substituindo este termo na Equação 11, tem-se a Expressão 12., que sofre um rearranjo, transformando-se na Equação 13.

$$R = k M_0^{n-1} t - (n/2) R k M_0^{n-1} t$$

(12)

$$(t/R) = (nt/2) + (kM_0^{n-1})^{-1}$$

(13)



Devido ao fato da Expressão 13 ter sido deduzida por meio de aproximações, seu uso também leva a aproximações da ordem de reação. Todavia sua vantagem reside no fato de que a mesma utiliza um amplo intervalo de tempo. Connors (1990) utilizou a Equação 13 para calcular a ordem de uma reação cuja cinética era reconhecidamente de primeira ordem, chegando a valores de $n=1,2$.

Ensaio de flotação “rougher” em escala de bancada com fosfato de Tapira-MG foram executados nas condições normais (amido=500 g/t; Hydrocol=400 g/t, pH=9,5) até a exaustão da espuma, que ocorreu em 80 segundos. A recuperação (R) de P_2O_5 relativa a cada fração granulométrica foi calculada e apresentada na Figura 3, onde podemos verificar uma grande queda na recuperação das partículas com diâmetro menor que 0,074mm.

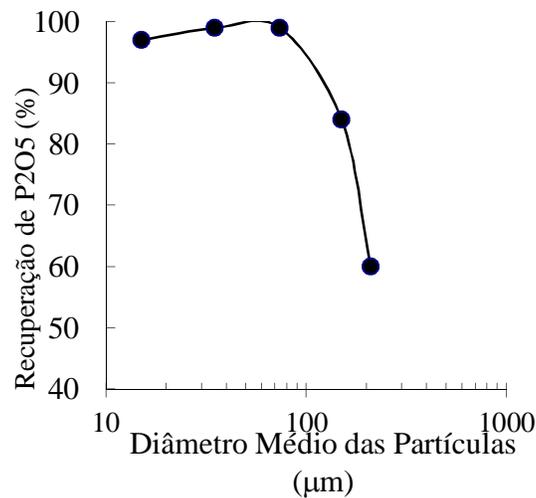


Figura 3 - Recuperação de P_2O_5 versus diâmetro das partículas.

Por outro lado, de acordo com a Figura 4, a cinética de flotação das partículas de granulometria mais grossa apresenta ordens superiores à unidade ($n>1$), indicando que estas apresentam cinética muito mais lenta que as partículas mais finas. Tamanha lentidão, certamente, se deve à dificuldade de preservar o agregado partícula/bolha frente



à turbulência criada pelo rotor da célula, uma vez que partículas mais grossas apresentam maior probabilidade de colisão.

Esta conclusão faz contraste com a literatura corrente (Finch e Dobby, 1990) que declara ser de primeira ordem a cinética de flotação. Tal conclusão, certamente, deve ter sido obtida com base em experimentos executados com minérios sulfetados, onde todas as partículas, via de regra, são moídas até que seu diâmetro fique inferior a 100 μm .

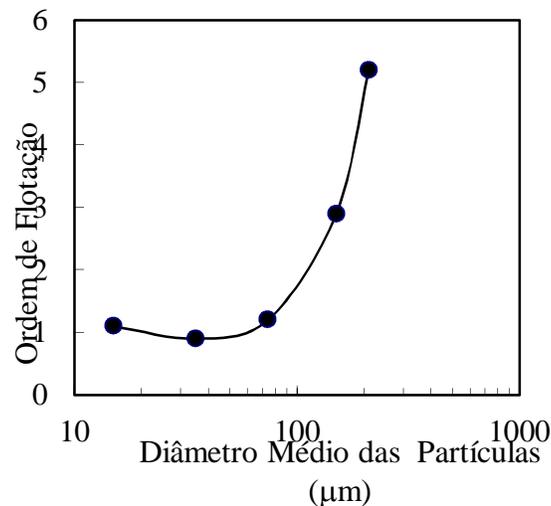


Figura 4 - Ordem da cinética de flotação versus tamanho de partículas.

Referências

- CONNORS, K. A. Chemical Kinetics: The Study of Reaction Rates in Solution, Madison, VCH Publishers, 1990. 469 p.
- FINCH, J. A.; DOBBY, G. S. Column Flotation., Oxford, Pergamon Press, 1990. 180 p.
- RODRIGUES, W. J.; LEAL FILHO, L. S. Dimensionless Hydrodynamic Parameters and Their Influence on Flotation Performance of Coarse Particles, Proceedings of the Minerals' Engineering 2000 Conference, MEI, Camborne, 2000 (sem paginação).
-